

**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**ANALISIS PENGARUH KENAIKAN TEMPERATUR DAN VARIASI KETEBALAN  
ISOLASI KERTAS YANG DIRENDAM PADA ISOLASI MINYAK TERHADAP  
BREAKDOWN VOLTAGE**

**Faishal Alim Mas'ud  
NRP 07111645000037**

**Dosen Pembimbing  
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T.,M.Sc  
Danar Fahmi S.T.,M.T**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2018**





**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**ANALISIS PENGARUH KENAIKAN TEMPERATUR DAN VARIASI  
KETEBALAN ISOLASI KERTAS YANG DIRENDAM PADA ISOLASI  
MINYAK TERHADAP *BREAKDOWN VOLTAGE***

**Faishal Alim Mas'ud  
NRP 07111645000037**

**Dosen Pembimbing  
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T.,M.Sc  
Danar Fahmi S.T.,M.T**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2018**

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----



**FINAL PROJECT - TE 141599**

***Analysis of Effects of Temperature Rise with Thickness  
Variation of Insulation Paper immersed on Oil Insulation  
of Breakdown Voltage***

**Faishal Alim Mas'ud  
NRP 07111645000037**

**ADVISOR  
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T.,M.Sc  
Daniar Fahmi S.T.,M.T**

**DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Electrical Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2018**

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Analisis Pengaruh Kenaikan Temperatur dan Variasi Ketebalan Isolasi Kertas yang direndam pada Isolasi Minyak Terhadap *Breakdown Voltage* ”** adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2018



Faishal Alim Mas'ud  
Nrp.07111645000037

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----



**ANALISIS PENGARUH KENAIKAN TEMPERATUR  
DAN VARIASI KETEBALAN ISOLASI KERTAS YANG  
DIRENDAM PADA ISOLASI MINYAK TERHADAP  
BREAKDOWN VOLTAGE**

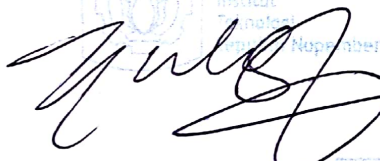
**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I**



**Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T., M.Sc**  
**NIP. 197007121998021001**

**Dosen Pembimbing II**



**Daniar Fahmi, ST., MT**  
**NIP. 198909252014041002**



-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

# **Analisis Pengaruh Kenaikan Temperatur dengan Variasi Ketebalan Isolasi Kertas yang direndam pada Isolasi Minyak Terhadap *Breakdown Voltage***

Nama : Faishal Alim Mas'ud  
NRP : 07111645000037  
Dosen Pembimbing 1 : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T.,M.Sc.  
Dosen Pembimbing 2 : Daniar Fahmi S.T.,M.T.

## **ABSTRAK**

Kelangsungan operasi transformator sangat bergantung pada kualitas dari isolasinya. Pada operasi transformator terjadi proses thermal yang dapat menyebabkan berkurangan kualitas isolasinya. Pentingnya fungsi isolasi terutama isolasi kertas, maka dilakukanlah penelitian tentang isolasi kertas untuk mendapatkan karakteristik *breakdown voltage* terhadap pengaruh kenaikan temperatur dan variasi ketebalan isolasi kertas yang direndam (impregnasi) kedalam isolasi minyak. Penelitian dengan pembangkitan tegangan tinggi AC (50 Hz) dan menggunakan elektroda *mushroom* sesuai standart IEC 60156 untuk menguji *breakdown voltage*, dan uji kadar selulosa dengan menggunakan metode *Chesson* untuk mendapatkan kadar selulosa pada kertas. Dari penelitian ini bahan isolasi yang digunakan adalah kertas *kraft* (*diamond-dotted paper*) dan minyak isolasi untuk perendaman adalah minyak mineral. Pada pengujian yang dilakukan akan didapatkan karakteristik isolasi kertas dengan kenaikan temperatur dan variasi ketebalan. Dari hasil pengujian didapatkan nilai *breakdown voltage* dengan bertambahnya ketebalan nilai *breakdown voltage* semakin meningkat, dan pengaruh kenaikan temperatur dari 30°C sampai 105 °C nilai *breakdown voltage* semakin bertambah. Pada temperatur lebih dari 105 °C didapatkan nilai *breakdown voltage* semakin menurun diikuti dengan penurunan kadar selulosa pada kertas isolasi.

*Kata Kunci*— isolasi kertas, kraft paper, impregnasi minyak, *breakdown voltage*, kadar selulosa.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

## ***Analysis of Effects of Temperature Rise with Thickness Variation of Insulation Paper immersed on Oil Insulation of Breakdown Voltage***

Nama : Faishal Alim Mas'ud  
NRP : 07111645000037  
Dosen Pembimbing 1 : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T.,M.Sc.  
Dosen Pembimbing 2 : Daniar Fahmi S.T.,M.T.

### ***ABSTRACT***

*The transformer operation is very advantage on quality of insulation. In the transformer operation occurs a thermal proses that can lead to reduced quality of insulation. The importance of insulation function, espencially of paper insulation, then conducted research on paper isolation to get breakdown voltage characteristics against the influence of temperature rise and variation of insulation thickness of paper immersed (impregnation) in oil insulation. Research by generating high-voltage AC (50 Hz) and using mushroom electrodes according to IEC 60156 standard to test breakdown voltage, and test cellulose content using Chesson method to obtain cellulose content on paper. Testing of insulation materials used is kraft paper (diamond-dotted paper) and oil insulation for immersion is mineral oil. In the test conducted will get the characteristics of paper insulation with increasing temperature and thickness variation. From the test results obtained breakdown voltage value with increasing the thickness of the breakdown voltage value increases, and the influence of temperature rise from 30°C to 105°C breakdown voltage value increases. At temperatures greater than 105°C, the breakdown voltage value decreases, followed by a decrease in cellulose levels on the insulating paper.*

*Keywords - paper insulation, kraft paper, oil impregnation, breakdown voltage, cellulose levels.*

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat-Nya penulis bisa menyelesaikan Tugas Akhir Penulis yang berjudul : **“Analisis Pengaruh Kenaikan Temperatur dengan Variasi Ketebalan Isolasi Kertas yang Direndam pada Isolasi Minyak Terhadap *Breadown Voltage*”** secara tepat waktu.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pelaksanaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan pihak. Sehingga penulisan mengucapkan terima kasih kepada :

1. Orang Tua penulis yang selalu memberikan motivasi dan doa kepada penulis, sehingga Tugas Akhir ini bisa terselesaikan.
2. Bapak Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T.,M.Sc sebagai Dosen Pembimbing I Tugas Akhir.
3. Bapak Daniar Fahmi S.T., M.T sebagai Dosen Pembimbing II Tugas Akhir.
4. Seluruh Asisten Laboratorium Tegangan Tinggi ITS-Surabaya.
5. Pihak Bambang Djaja yang telah memfasilitasi Tugas Akhir
6. Keluarga Lintas Jalur 2016 yang telah memberikan semangat kepada penulis.

Pada Tugas Akhir ini penulis juga menyadari dalam penyusunan buku ini terdapat kekurangan, maka dari itu penulis berharap mendapatkan kritik dan saran yang membangun.

Surabaya, Juni 2018

Penulis

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----



# DAFTAR ISI

## HALAMAN

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PENGESAHAN .....	ix
ABSTRAK.....	xi
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR .....	xxi
DAFTAR TABEL .....	xxiii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Permasalahan .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Metodologi Penelitian .....	4
1.6 Sistematika Laporan .....	5
BAB II TEORI DASAR.....	7
2.1 Dielektrik .....	7
2.1.1 Kekuatan Dielektrik .....	8
2.1.2 Konduktansi.....	8
2.1.3 Tahanan Isolasi .....	8
2.1.4 Rugi-rugi Dielektrik.....	9
2.1.5 Partial Discharge .....	9
2.1.6 Tracking Strength .....	11
2.2 Pengertian Bahan Isolasi.....	11
2.3 Bahan Isolasi Padat .....	12
2.4 Mekanisme Kegagalan Isolasi Padat.....	12
2.4.1 Kegagalan Asasi (Intrinsik).....	13
2.4.2 Kegagalan Elektromekanik .....	13
2.4.3 Kegagalan Streamer .....	14
2.4.4 Kegagalan Termal.....	14
2.4.5 Kegagalan Erosi.....	14
2.5 Bahan Isolasi Cair .....	15
2.6 Isolasi Minyak.....	15
2.7 Isolasi Kertas.....	16
2.8 Kraft paper .....	17
2.9 Struktur Pada Kertas Isolasi.....	17
2.10 Impregnasi Isolasi Kertas pada Minyak .....	18
2.11 Mekanisme Penuaan Kertas .....	19

BAB III PENGARUH KENAIKAN TEMPERATUR DAN VARIASI KETEBALAN KERTAS ISOLASI.....	21
3.1 Identifikasi Masalah.....	21
3.2 Metodologi Penelitian .....	22
3.3 Perlatan pengujian.....	24
3.3.1 Pembangkitan Tegangan Tinggi AC .....	24
3.3.2 Modul Pengujian .....	25
3.3.3 Peralatan Tambahan .....	25
3.4 Bahan Pengujian .....	26
3.4.1 Kertas Isolasi.....	26
3.4.2 Minyak Mineral.....	26
3.5 Prosedur Penelitian .....	27
3.5.1 Flowchart Pengujian Isolasi Kertas Tanpa Direndam .....	28
3.5.2 Flowchart Pengujian Isolasi Kertas yang Direndam .....	29
3.6 Pengujian Isolasi Kertas Tanpa Perendaman .....	30
3.7 Pengujian Isolasi Kertas Dengan Perendaman dan Kenaikan Temperatur serta Ketebalan.....	30
3.8 Pengujian Kadar Selulosa .....	31
BAB IV HASIL DAN ANALISA.....	33
4.1 Pengujian Ketebalan Isolasi Kertas dalam Kondisi Kering (Dry).....	33
4.1.1 Analisis Hubungan <i>Breakdown Voltage</i> Isolasi Kertas dalam Kondisi Kering (Dry) .....	36
4.2 Pengujian Pengaruh Kenaikan Temperatur Isolasi Kertas yang Direndam pada Isolasi Minyak.....	37
4.2.1 Analisis Hubungan <i>Breakdown Voltage</i> dengan Pengaruh Kenaikan Temperatur Isolasi Kertas yang Direndam pada Isolasi Minyak.....	37
4.3 Pengujian Pengaruh Kenaikan Temperatur Isolasi Kertas dan Ketebalan yang Direndam pada Isolasi Minyak.....	39
4.3.1 Analisis Hubungan <i>Breakdown Voltage</i> dengan Pengaruh Kenaikan Temperatur dan Ketebalan Isolasi Kertas yang Terendam pada Isolasi Minyak .....	41
4.4 Analisis Mekanisme Kegagalan Isolasi Kertas yang direndam Minyak .....	42
BAB V PENUTUP .....	45
5.1 Kesimpulan.....	45
5.2 Saran .....	45
DAFTAR PUSTAKA.....	47
LAMPIRAN A .....	48

1. Data Sheet Kertas isolasi jenis Kraft ( *diamond-dotted paper* ) . 48
2. Data Pengujian Sampel..... 48

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Arus pada suatu dielektrik .....	9
<b>Gambar 2.2</b> Celah udara pada dielektrik padat .....	10
<b>Gambar 2.3</b> Proses kegagalan isolasi zat padat[4] .....	13
<b>Gambar 2.4</b> Minyak isolasi .....	16
<b>Gambar 2.5</b> kertas isolasi pada transformator[5] .....	16
<b>Gambar 2.6</b> Kertas kraft ( <i>diamond-dotted paper</i> ) .....	17
<b>Gambar 2.7</b> Struktur Kimia dari Selulosa .....	18
<b>Gambar 2.8</b> Faktor yang mempengaruhi kinerja dan umur dari isolasi pada transformator[11]. .....	20
<b>Gambar 2.9</b> Plot Arrhenius dengan perbedaan mekanisme penuaan[11] .....	20
<b>Gambar 3.1</b> <i>Experiment Set-Up</i> .....	23
<b>Gambar 3.2</b> Pengujian Terhadap isolasi kertas .....	23
<b>Gambar 3.3</b> Titik pengujian <i>breakdown voltage</i> .....	23
<b>Gambar 3.4</b> Pembangkitan Tegangan Tinggi AC (a), Skema Pembangkitan Tegangan AC (b) .....	24
<b>Gambar 3.5</b> Elektroda <i>mushroom</i> .....	25
<b>Gambar 3.6</b> Thermometer IR(a), Gelas <i>beaker</i> (b), Pemanas listrik(c), Micrometer Sekrup(d). .....	25
<b>Gambar 3.7</b> Sampel Minyak Mineral (a), Kertas DDP (b) .....	26
<b>Gambar 3.8</b> Rangkaian pengujian <i>breakdown voltage</i> .....	27
<b>Gambar 3.9</b> Flowchart pengujian <i>breakdown voltage</i> isolasi kertas tanpa direndam .....	28
<b>Gambar 3.10</b> Flowchart pengujian <i>breakdown voltage</i> isolasi kertas tanpa direndam .....	29
<b>Gambar 3.11</b> Sampel kertas isolasi dalam kondisi kering ( <i>dry</i> ) .....	30
<b>Gambar 3.12</b> Pemanasan kertas isolasi(a), Pengecekan suhu(b) .....	31
<b>Gambar 3.13</b> Proses refluks dengan water bath .....	32
<b>Gambar 4.1</b> Grafik hasil pengujian <i>breakdown voltage</i> isolasi kertas .....	36
<b>Gambar 4.2</b> Grafik <i>breakdown voltage</i> akibat pengaruh kenaikan temperatur isolasi kertas yang direndam pada isolasi minyak. ....	38
<b>Gambar 4.3</b> Pengaruh kenaikan temperature dan ketebalan kertas yang direndam pada minyak .....	41
<b>Gambar 4.4</b> Grafik kadar selulosa pada kertas .....	43

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Kelas isolasi bahan padat .....	18
<b>Tabel 4.1</b> Nilai <i>Breakdown voltage</i> dengan ketebalan 0.05 mm .....	34
<b>Tabel 4.2</b> Nilai <i>Breakdown voltage</i> dengan ketebalan 0.25 mm .....	34
<b>Tabel 4.3</b> Nilai <i>Breakdown voltage</i> dengan ketebalan 0.5 mm .....	34
<b>Tabel 4.4</b> Nilai <i>Breakdown voltage</i> dengan ketebalan 0.75 mm .....	35
<b>Tabel 4.5</b> Nilai <i>Breakdown voltage</i> dengan ketebalan 1 mm .....	35
<b>Tabel 4.6</b> Hasil pengujian Kenaikan temperature Isolasi kertas yang direndam pada isolasi minyak .....	37
<b>Tabel 4.7</b> Hasil pengujian Kenaikan temperature Isolasi kertas yang direndam dengan ketebalan 0.25 mm .....	39
<b>Tabel 4.8</b> Hasil pengujian Kenaikan temperature Isolasi kertas yang direndam dengan ketebalan 0.50 mm .....	39
<b>Tabel 4.9</b> Hasil pengujian Kenaikan temperature Isolasi kertas yang direndam dengan ketebalan 0.75 mm .....	40
<b>Tabel 4.10</b> Hasil pengujian Kenaikan temperature Isolasi kertas yang direndam dengan ketebalan 1 mm .....	40
<b>Tabel 4.11</b> Hasil Kadar Selulosa dengan Uji Chesson .....	43

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Kebutuhan listrik di Indonesia yang semakin berkembang setiap tahunnya, dengan ratio pertambahan 6.5 % tiap tahun menurut data Perusahaan Listrik Negara ( PLN ) [1]. Pada sistem tenaga listrik dalam proses penyaluran listrik mulai dari pembangkit, transmisi dan distribusi terdapat transformator yang merupakan alat yang paling penting dalam penyaluran tenaga listrik. Transformator memiliki fungsi sebagai transformasi tegangan tanpa merubah frekuensi yang digunakan dalam sebuah sistem yang dibangkitkan. Seiring dengan bertambahnya kebutuhan listrik maka transformator sangat dijaga dalam proses pengoprasiaannya. Dalam pengoprasian transformator tidak lepas dari suatu proses kegagalan, adapun jenis kegagalan yaitu berupa kegagalan termal, kegagalan isolasi atau dielektrik dan kegagalan mekanik. Jika kegagalan tersebut terjadi maka dalam proses penyaluran listrik akan terganggu. Jika terjadi kerusakan pada transformator, maka untuk memperbaikinya, dibutuhkan biaya yang cukup besar dan membutuhkan waktu yang tidak singkat untuk memperbaikinya. Hal tersebut akan menyebabkan kerugian finansial.

Transformator daya beroperasi selama 24 jam, pada kelangsungan operasi transformator sangat bergantung pada kualitas dari isolasinya. Terdapat fenomena kegagalan isolasi karena panas yang berlebih. Adanya penyebab panas pada transformator yang diakibatkan beban berlebih, pelepasan beban seketika, pemanasan dielektrik, adanya arus eddy current, rugi histerisis, dan lain sebagainya. Dengan pengaruh suhu yang tinggi dapat menjadi parameter yang paling berpengaruh terhadap kondisi pada sebuah kertas isolasi pada transformator. Perubahan suhu tinggi akan menyebabkan banyak reaksi pada isolasi minyak dan kertas yang akan mempercepat umur dari isolasi pada transformator yang dapat mempengaruhi *breakdown voltage*.

Pada pengujian tentang “*Pengaruh Rendaman Minyak Transformator Terhadap Kekuatan Dielektrik Isolasi Kertas*” pada pengujian tersebut didapatkan hasil rendaman akan menambah kekuatan dielektrik pada kertas dengan melakukan pengujian menggunakan minyak mineral “*Shell diala B*” dan pengujian menggunakan elektroda Plat[2]. Pada pengujian tersebut tidak menganalisa tentang pengaruh temperature pada pengujiannya, Oleh karena itu pada penelitian ini

menganalisa pengaruh kenaikan temperature dan ketebalan lapisan kertas untuk mengetahui karakteristik dari pengaruh rendaman kertas terhadap uji *breakdown voltage*.

Pengaruh kenaikan temperatur dengan perendaman kertas isolasi kedalam minyak isolasi akan menyebabkan pengaruh pada *breakdown voltage*. Dalam studi ini, dilakukan pengujian dengan kertas isolasi yang direndam pada minyak isolasi dengan pengaruh perubahan temperatur, lapisan kertas yang berbeda terhadap *breakdown voltage* maka akan di dapat perbandingan untuk mengetahui karakteristik dari kertas isolasi tersebut. Melalui pengujian ini, maka akan mendapatkan hasil yang diharapkan dapat memberi manfaat untuk bisa dikembangkan lagi dan dapat menjadi pertimbangan untuk pemilihan karakteristik dalam pembuatan transformator untuk berapa jumlah lapisan kertas yang ideal dan efektif dalam jangka waktu yang lama.

Berdasarkan uraian diatas, penelitian tentang pengujian yang berjudul “Analisa Pengaruh Kenaikan Temperatur dan Variasi Ketebalan Isolasi kertas yang Direndam oleh Isolasi Minyak Terhadap *Breakdown Voltage*” dengan menggunakan standar IEC 60156 dengan menggunakan elektroda bola atau *mushroom* yang beridiameter 25 mm, pengujian dilakukan dengan temperature kerja 30°C sampai 135°C dan ketebalan yang berbeda. Tujuan dari pecobaan tersebut adalah pengujian *breakdown voltage* dengan pengaruh kenaikan temperatur, variasi ketebalan kertas isolasi. Adapaun pengujian kadar selulosa pada kertas untuk mengetahui pengaruh akibat pemanasan terhadap isolasi.

## **1.2 Permasalahan**

Hal yang menjadi permasalahan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah:

1. Menganalisa karakteristik isolasi kertas akibat perendaman isolasi minyak.
2. Menguji Ketebalan kertas isolasi dalam kondisi kering.
3. Menguji pengaruh kenaikan temperature dan variasi ketebalan pada kertas yang direndam dalam minyak isolasi.
4. Menguji kadar selulosa pada kertas sebelum direndam dan sesudah direndam dengan pengaruh kenaikan temperatur

### 1.3 Batasan Masalah

Untuk menyelesaikan masalah dalam Tugas Akhir ini, maka perlu diberi batasan-batasan sebagai berikut:

1. Jenis pengujian adalah *breakdown voltage* pada isolasi kertas dengan media perendaman pada minyak.
2. Pengujian dilakukan dengan merubah temperatur dan ketebalan kertas.
3. Isolasi kertas yang diuji adalah kertas kraft dengan jenis *diamond-dotted paper*.
4. Ketebalan kertas yang digunakan dengan asumsi 0.05, 0.25, 0.50, 0.75, 1 mm
5. Temperatur yang digunakan 30°C sampai dengan 135 °C, dengan penambahan temperatur 15°C setiap sampelnya
6. Minyak yang digunakan untuk impregnasi adalah minyak mineral (*Nynas Nitro Libra*).
7. Pengujian dilakukan dengan menggunakan tegangan AC dengan frekuensi 50 Hz.
8. Pengujian dilakukan tidak dalam kondisi vakum sempurna serta tekanan udara dan kelembapan tidak dapat disesuaikan, karena keterbatasan alat uji.
9. Kandungan air dalam kertas hanya diminimalkan dengan proses pemanasan.

### 1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini adalah:

1. Mengetahui karakteristik isolasi kertas yang direndam pada minyak isolasi dengan uji *breakdown voltage*.
2. Mengetahui pengaruh kenaikan temperature pada isolasi kertas yang direndam pada isolasi minyak.
3. Mengetahui pengaruh ketebalan kertas.
4. Mengetahui kadar selulosa pada isolasi kertas sebelum direndam dan sesudah direndam dengan pengaruh temperatur.

## 1.5 Metodologi Penelitian

Pada penelitian analisis pengaruh analisa pengaruh kenaikan temperatur dan variasi ketebalan isolasi kertas yang direndam oleh isolasi minyak terhadap *breakdown voltage* diawali dengan studi literatur. Studi literatur dimaksudkan untuk memperoleh informasi-informasi yang berkaitan dengan tema Tugas Akhir. Studi literatur dilakukan dengan melakukan pembelajaran dari jurnal, *paper*, Tugas Akhir sebelumnya, serta buku yang mempunyai pokok bahasan sejenis dengan Tugas Akhir.

Berikutnya adalah tahap persiapan sebelum dilakukan penelitian. Pada tahap persiapan dilakukan pengumpulan bahan dan peralatan uji seperti kertas isolasi dan minyak isolasi pada transformator yang diperoleh dari PT. Bambang Djaja sebanyak 5 liter minyak mineral yang berjenis Nynas Nitro Libra dan 5 kg kertas kraft paper yang berjenis *Diamond Dotted Paper*.

Selanjutnya melakukan penelitian dengan cara menguji tegangan tembus atau *breakdown voltage* untuk mengetahui karakteristiknya. Kertas isolasi yang diuji terdiri dari 5 ketebalan yang berbeda yaitu 0.05 mm, 0.25 mm, 0.5 mm, 0.75 mm, dan 1 mm yang direndam dalam minyak dengan kenaikan suhu yaitu 30°C sampai 135°C. Selanjutnya melakukan pengujian tanpa perendaman kertas isolasi dalam minyak, dengan ketebalan yang sama, Pengujian dilakukan dengan menggunakan perangkat uji pada Laboratorium Tegangan Tinggi. *Breakdown voltage test* diselenggarakan berdasarkan standar IEC 60156 yakni menggunakan dua buah elektrode berbentuk *mushroom* atau bola dengan diameter elektroda 25 mm. Pada *breakdown voltage test* diinjeksikan tegangan secara bertahap hingga mengalami *breakdown voltage*. Setelah pengujian nilai *breakdown voltage* maka dilakukan pengujian kadar selulosa yang ada pada kertas isolasi saat sebelum direndam dan setelah direndam dengan pengaruh temperatur yang tinggi. Hasil percobaan dicatat untuk proses analisa.

Setelah data percobaan didapat, selanjutnya dilakukan analisa tentang karakteristik. Dari hasil tersebut dapat dibuat suatu kesimpulan dan selanjutnya ditulis dalam sebuah laporan Tugas Akhir.

## **1.6 Sistematika Laporan**

Pembahasan tugas akhir ini dibagi menjadi lima bab dengan sistematika sebagai berikut:

### **BAB I : Pendahuluan**

Pada bab pendahuluan ini akan dibahas mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika pembahasan dan relevansi.

### **BAB II : Dasar Teori**

Pada bab ini secara garis besar akan diterangkan teori mengenai jenis isolasi pada transformator, penyebab kegagalan pada isolasi kertas dan isolasi minyak, dan ketahanan dielektrik pada isolasi.

### **BAB III : Pengaruh Kenaikan Temperatur Dan Variasi Ketebalan Isolasi Kertas**

Pada bab ini membahas tentang metode dan langkah – langkah prosedur pengujian ketahanan dielektrik pada isolasi transformer sesuai standar pengujian IEC 60156.

### **BAB IV : Hasil Analisis Data**

Pada bab ini dilakukan analisis pengaruh perubahan temperatur pada kertas isolasi dan ketebalan lapisan dengan pengaruh perendaman pada minyak isolasi.

### **BAB V : Penutup**

Pada bab ini dijelaskan mengenai kesimpulan dari seluruh hasil penelitian dan pembahasan serta saran yang diharapkan dapat bermanfaat untuk penelitian isolasi kertas lebih lanjut.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

## **BAB II**

### **TEORI DASAR**

#### **2.1 Dielektrik**

Dielektrik adalah suatu bahan yang memiliki daya hantar arus yang sangat kecil. Bahan dielektrik dapat berupa gas, padat, dan cair. Pada bahan dielektrik tidak terdapat electron-elektron yang bebas bergerak akibat oleh pengaruh medan listrik. Sifat inilah yang dapat menyebabkan bahan dielektrik merupakan isolator yang baik. Dalam bahan dielektrik, semua elektron-elektron terikat dengan kuat pada intinya sehingga terbentuk suatu struktur regangan benda padat, gas dan cair.

Bahan dielektrik padat digunakan pada hampir seluruh rangkaian listrik dan peralatan listrik untuk mengisolir bagian-bagian pembawa arus dari bagian lainnya. Bahan dielektrik padat yang baik harus mempunyai rugi-rugi dielektrikum yang rendah, kekuatan mekanis yang tinggi, bebas dari kemungkinan pembentukan gas dan debu, dan tahan terhadap perubahan temperatur dan pengaruh kimia.

Isolasi padat mempunyai kekuatan tegangan tembus yang tinggi dibandingkan dengan isolasi cair dan gas. Studi yang paling penting dalam teknik isolasi adalah studi tegangan tembus dari dielektrik padat. Jika terjadi tembus, maka isolasi padat akan rusak secara permanen sedangkan pada isolasi gas akan kembali ke sifatnya semula dan pada isolasi cair sebagian akan kembali ke sifatnya semula dan sebagian lainnya tidak.

Masing – masing jenis dielektrik memiliki fungsi yang penting dari suatu bahan isolasi adalah[2]:

- a. Untuk dapat mengisolasi antara suatu penghantar dengan penghantar lainnya.
- b. Untuk menahan gaya mekanis akibat adanya arus pada konduktor yang diisolasi.
- c. Mampu menahan tekanan yang diakibatkan oleh suhu dan reaksi kimia.

Tekanan yang disebabkan oleh medan listrik, gaya mekanik, thermal dan reaksi kimia dapat terjadi secara bersamaan, sehingga perlu diketahui efek dari semua parameter tersebut, maka suatu bahan isolasi dinyatakan ekonomis jika bahan tersebut dapat menahan semua parameter tersebut dalam periode yang lama. Berikut sifat – sifat dari suatu bahan dielektrik antara lain[2]:

- a. Kekuatan dielektrik
- b. Konduktansi
- c. Tahanan isolasi
- d. Rugi – rugi dielektrik
- e. *Partial Discharge*
- f. *Tracking Strenght*

### **2.1.1 Kekuatan Dielektrik**

Semua bahan dielektrik mempunyai tingkat ketahanan yang disebut dengan kekuatan dielektrik (*dielectric strength*) yang dapat diartikan sebagai tekanan listrik yang dapat ditahan oleh dielektrik tersebut tanpa merubah sifatnya menjadi konduktif. Apabila bahan dielektrik berubah sifat menjadi konduktif maka tahanan suatu dielektrik sudah mengalami *breakdown*. Tegangan tembus (*breakdown voltage*) suatu isolator adalah tegangan minimum yang dibutuhkan untuk merusak dielektrik tersebut. Kekuatan dielektrik dari suatu bahan dinyatakan dengan tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh bahan dielektrik[2]. Sehingga kekuatan dielektrik dapat diartikan sebagai kemampuan suatu material untuk menahan tegangan tinggi tanpa berakibat terjadinya kegagalan.

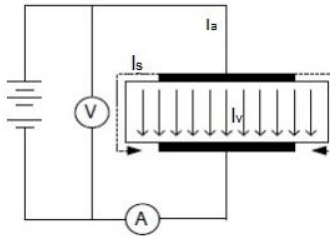
### **2.1.2 Konduktansi**

Ukuran kemampuan suatu bahan untuk mengalirkan muatan listrik. Nilai konduktansi berbanding terbalik dengan nilai hambatan. Nilai konduktansi yang besar menunjukkan bahwa bahan tersebut mampu mengkonduksikan arus dengan baik, apabila nilai konduktansi rendah maka bahan tersebut tidak dapat mengalirkan arus dengan baik. Nilai konduktansi akan menurun dengan kenaikan temperature.

### **2.1.3 Tahanan Isolasi**

Tahanan isolasi adalah ukuran kebocoran arus yang melalui sebuah bahan dielektrik. Tahanan isolasi akan berubah karena pengaruh dari temperature dan lamanya tegangan yang diterapkan. Jika suatu dielektrik diberi tegangan searah, maka arus yang mengalir pada dielektrik terdiri dari dua komponen, yaitu arus yang mengalir pada permukaan dielektrik ( $I_s$ ) dan arus yang mengalir melalui volume dielektrik ( $I_v$ ) seperti terlihat pada Gambar 2.1 sehingga hambatan dielektrik terdiri dari resistensi permukaan dan resistansi volume[2].





**Gambar 2.1** Arus pada suatu dielektrik

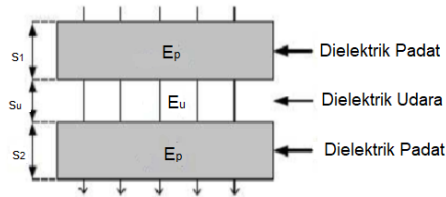
#### 2.1.4 Rugi-rugi Dielektrik

Rugi-rugi dielektrik pada isolasi tegangan tinggi merupakan ukuran penting terhadap kualitas material dari isolasi. Suatu bahan dielektrik tersusun atas molekul-molekul dan elektron-elektron terikat kuat dengan inti atomnya. Ketika bahan tersebut belum dikenai medan listrik, maka susunan molekul dielektrik tersebut masih belum beraturan (tidak tersusun rapi). Ketika molekul tersebut terkena medan listrik, maka muatan positif akan mengalami gaya yang searah dengan medan listrik dan electron dalam molekul tersebut akan mengalami gaya yang berlawanan dengan arah medan listrik.

Perubahan arah molekul akan menimbulkan gesekan anatar melekul – molekul yang lain karena adanya medan listrik yang berubah setiap saat. Gesekan antar molekul ini akan menimbulkan panas yang disebut dengan rugi-rugi dielektrik.

#### 2.1.5 Partial Dischaeg

Peluhan parsial (*partial discharge*) adalah peristiwa pelepasan/ loncatan busur api listrik yang terjadi pada suatu bagian isolasi (pada rongga dalam atau pada permukaan) sebagai akibat adanya beda potensial yang tinggi dalam isolasi tersebut. Partial discharge dapat terjadi pada bahan isolasi padat, cair, maupun gas. Adanya partial discharge di dalam bahan isolasi dapat ditentukan dengan tiga metode yaitu: Dengan pengukuran tegangan pada objek, dengan pengukuran arus di dalam rangkain luar dan mengukur intensitas radiasi gelombang elektromagnetik yang disebabkan karena adanya *partial discharge*[2]. Berikut adalah peristiwa yang terjadi pada isolasi padat yang didalamnya terdapat rongga udara seperti pada Gambar 2.2 dibawah ini:



**Gambar 2.2** Celah udara pada dielektrik padat

Jika medan elektrik yang dihasilkan pada kedua elektroda piring sejajar yang memiliki luas tak hingga, maka kuat medan elektrik pada setiap lapisan adalah:

$$E_m = \frac{V}{\left(\frac{S_1}{\delta_1} + \frac{S_2}{\delta_2} + \frac{S_u}{\delta_u}\right)} \quad (2.2)$$

Keterangan :

V : Tegangan Elektroda (V)

$\delta$  : Konstanta Dielektrik ( $\varepsilon$ )

S : Tebal Dielektrik (cm)

Apabila konstanta dielektrik padat adalah enam dan konstanta dielektrik udara adalah satu, maka kuat medan dielektrik pada celah udara relative sangat kecil dibandingkan tebal keseluruhan dielektrik padat ( $S_1 + S_2$ ), maka kuat medan dielektrik pada celah udara adalah:

$$E_u = \frac{6V}{S_1 + S_2} \quad (2.3)$$

Dengan cara yang sama dapat dihitung kuat medan elektrik pada dielektrik padat adalah:

$$E_p = \frac{V}{S_1 + S_2} \quad (2.4)$$

Bahwa kuat medan dielektrik pada celah udara enam kali lebih besar dari kuat medan dielektrik padat. Sedangkan kekuatan dielektrik udara jauh lebih kecil dari kekuatan dielektrik padat. Jika kuat medan dielektrik di celah udara melebihi kekuatan dielektrik padat, maka udara akan terjadi tembus tegangan. Karena tembus tegangan hanya terjadi pada celah udara maka peristiwa tersebut adalah peluahan parsial (*partial discharge*).

### 2.1.6 Tracking Strenght

Apabila suatu sistem isolasi diberi tekanan elektrik, maka arus akan mengalir pada permukaannya. Besar arus permukaan ini ditentukan dengan besaran tahanan pada permukaan isolasi. Arus ini sering juga disebut arus bocor atau arus yang melewati permukaan isolasi[2]. Besar arus tersebut dipengaruhi oleh kondisi sekitar, yaitu suhu, tekanan, kelembaban dan polusi.

Arus bocor menimbulkan panas, dan timbulnya penguraian pada bahan kimia yang membentuk dipermukaan sistem isolasi. Panas yang ditimbulkan arus bocor dapat juga menimbulkan erosi. Erosi dapat menyebabkan suatu kegagalan yang disebabkan oleh zat isolasi yang tidak sempurna akibat terjadinya panas dan terbentuknya lubang pada isolasi padat yang kemudian terisi oleh udara atau gas.

## 2.2 Pengertian Bahan Isolasi

Bahan isolasi merupakan alat yang digunakan untuk pembatas dan pengamanan pada peralatan listrik yang mempunyai kekuatan listrik yang cukup untuk menjamin sistem keselamatan yang diperlukan pada saat peralatan listrik tersebut beroperasi atau tidak beroperasi, sehingga tidak terjadi kebocoran arus, lompatan api (*flashover*), ataupun percikan api (*sparkover*). Kemampuan bahan isolasi untuk menahan tegangan disebut kekuatan dielektrik. Kekuatan dielektrik dari bahan isolasi sangat penting dalam menentukan kualitas isolasi yang nantinya akan mendukung keseluruhan sistem tenaga listrik. Bahan isolasi yang digunakan dalam teknik tegangan tinggi dibedakan menjadi tiga, yaitu isolasi cair, isolasi padat dan isolasi gas.

Berdasarkan fungsinya, bahan isolasi dapat digolongkan menjadi:

- a. Penyangga/penggantung (*solid support*) yaitu bahan isolasi berbentuk padat. (contoh : polimer, keramik, kaca dan lain-lain)
- b. Bahan pengisi (*filling media*) yaitu bahan isolasi berbentuk cair atau gas. (contoh :minyak, gas dan aneka gas lainnya seperti SF<sub>6</sub>)
- c. Bahan penutup (*covering material*) yaitu bahan isolasi yang biasanya terdapat pada bagian luar, berupa bahan padat atau cair. (contoh :mika, kertas, pernis dan resi ).

Suatu bahan isolasi yang baik harus mempunyai resistensi isolasi tinggi dan kekuatan dielektrik yang baik sehingga sifat hantarannya dapat diminimalkan.

### 2.3 Bahan Isolasi Padat

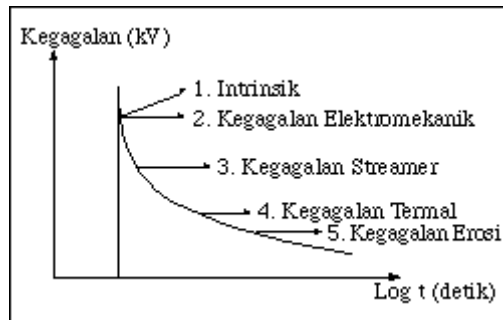
Bahan isolasi padat dapat digunakan pada segala macam rangkaian dan peralatan listrik untuk memisahkan satu konduktor dengan konduktor yang lainnya saat beroperasi pada sistem yang bertegangan dengan peralatan yang tidak bertegangan atau dengan sistem yang memiliki tegangan yang berbeda. Suatu bahan isolasi padat yang baik haruslah memiliki kerugian dielektrik yang rendah, kekuatan mekanik yang baik, tidak mengandung gas dan uap air didalamnya[2].

Isolasi padat biasanya digunakan pada sistem yang terletak diluar maupun didalam sistem. Aplikasi yang digunakan pada isolasi padat diluar mempunyai space ruang yang luas, contoh isolator pada tiang-tiang jaringan distribusi dan transmisi. Sedangkan pada isolasi padat didalam sistem memiliki space ruang yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan, contohnya adalah penggunaan kertas *kraft* pada transformator untuk memisahkan belitan tiap polritas tegangan.

### 2.4 Mekanisme Kegagalan Isolasi Padat

Mempelajari kegagalan yang terjadi pada benda padat adalah sangat penting. Pada benda padat, apabila terjadi kegagalan, maka ia adalah kegagalan permanen, karena ia termasuk bahan yang *non-self restoring*. Sebaliknya untuk benda cair dan gas, bila terjadi kegagalan maka kegagalan ini adalah kegagalan yang sementara. Sesudah beberapa lama maka kekuatannya akan kembali lagi. Bahan ini termasuk bahan yang *self restoring*. Adapun proses kegagalan isolasi zat padat seperti pada Gambar 2.3. Beberapa kegagalan pada benda padat dapat digolongkan seperti berikut[4]:

- a. Kegagalan Intrinsik (asasi)
- b. Kegagalan elektromekanik
- c. Kegagalan streamer
- d. Kegagalan termal
- e. Kegagalan erosi



**Gambar 2.3** Proses kegagalan isolasi zat padat[4]

#### 2.4.1 Kegagalan Asasi (Intrinsik)

Kegagalan asasi (intrinsik) adalah kegagalan yang disebabkan oleh jenis dan suhu bahan dengan menghilangkan pengaruh luar seperti tekanan, bahan elektroda, ketidakmurnian, kantong kantong udara. Kegagalan intrinsik terjadi jika diterapkan tegangan tinggi pada lapisan dielektrik yang tipis. Hal ini terjadi pada waktu yang singkat dan disebabkan karena medan listrik yang tinggi dimana elektron mendapatkan energi dari tegangan luar sehingga melintasi celah yang terlarang (*forbidden energy gap*) sampai ke lapisan konduksi. Adapun sifat dari kegagalan ini adalah:

- a. Terjadi pada suhu yang rendah, suhu kamar atau lebih rendah. Kekuatan kegagalan tidak bergantung pada bentuk gelombang dari tegangan yang diterapkan dan terjadi pada waktu yang singkat.
- b. Kegagalan tergantung pada bentuk, besar dan spesimen dan bentuk dari kegagalan.

#### 2.4.2 Kegagalan Elektromekanik

Kegagalan elektromekanik adalah kegagalan yang disebabkan oleh adanya perbedaan polaritas antara elektroda yang mengapit zat isolasi padat sehingga timbul tekanan listrik pada bahan tersebut. Tekanan listrik yang terjadi menimbulkan tekanan mekanik yang menyebabkan timbulnya tarik menarik antara kedua elektroda tersebut.

### **2.4.3 Kegagalan Streamer**

Kegagalan streamer adalah kegagalan yang terjadi setelah banjiriran (*avalanche*). Sebuah elektron yang memasuki *band conduction* di katoda akan bergerak menuju anoda dibawah pengaruh medan memperoleh energi antara benturan dan kehilangan energi pada waktu membentur. Jika lintasan bebas cukup panjang maka tambahan energi yang diperoleh melebihi pengionisasi latis (*latice*). Akibatnya dihasilkan tambahan elektron pada saat terjadi benturan. Jika suatu tegangan  $V$  dikenakan terhadap elektroda bola, maka pada media yang berdekatan (gas atau udara) timbul tegangan. Karena gas mempunyai permitivitas lebih rendah dari zat padat sehingga gas akan mengalami tekanan listrik yang besar. Akibatnya gas tersebut akan mengalami kegagalan sebelum zat padat mencapai kekuatan asasinya. Karena kegagalan tersebut maka akan jatuh sebuah muatan pada permukaan zat padat sehingga medan yang tadinya seragam akan terganggu. Karena medan ini melebihi kekuatan intrinsik maka akan terjadi kegagalan pada zat padat. Proses kegagalan ini terjadi sedikit demi sedikit yang dapat menyebabkan kegagalan total.

### **2.4.4 Kegagalan Termal**

Kegagalan termal, adalah kegagalan yang terjadi jika kecepatan pembangkitan panas di suatu titik dalam bahan melebihi laju kecepatan pembuangan panas keluar. Akibatnya terjadi keadaan tidak stabil sehingga pada suatu saat bahan mengalami kegagalan. Rugi-rugi pada medan arus bolak balik lebih besar dari arus searah. Akibatnya kuat gagal termal pada tegangan AC lebih kecil daripada kuat gagal termal medan arus DC[6]. Kuat gagal termal untuk medan bolak balik juga menurun dengan naiknya frekuensi tegangan.

### **2.4.5 Kegagalan Erosi**

Pada pembuatan suatu isolasi dari kabel bawah tanah dan alat lainnya terkadang tidak sempurna, sehingga sering terdapat rongga dalam isolasi. Rongga ini berisi udara atau benda lain, yang mempunyai kekuatan medan atau kekuatan dielektrik yang berbeda dengan kekuatan dielektrik dari bahan isolasi. Bila rongga berisi udara maka akan terdapat konsentrasi medan listrik. Karena itu, pada nilai tegangan normal kekuatan medan pada rongga dapat bernilai melebihi kekuatan kegagalan, sehingga dapat menyebabkan terjadinya kegagalan. Kekuatan medan dalam rongga ditentukan oleh perbandingan dari

permitivitas dan bentuk rongga. Pada setiap pelepasan muatan terjadilah panas, dan lama kelamaan muka dari rongga akan terjadi karbonisasi dan dapat merusak susunan kimia isolasi dan terjadinya erosi. Kegagalan Erosi, adalah kegagalan yang disebabkan zat isolasi pada tidak sempurna, karena adanya lubang lubang atau rongga dalam bahan isolasi padat tersebut. Lubang/rongga akan terisi oleh gas atau cairan yang kekuatan gagalnya lebih kecil dari kekuatan zat padat.

Benturan elektron pada anoda mengakibatkan terlepasnya ikatan kimiawi pada isolasi padat tersebut. Demikian pula pemboman katoda oleh ion ion positif akan mengakibatkan kenaikan suhu yang menyebabkan ketidakstabilan termal, sehingga dinding zat padat lama kelamaan menjadi rusak, rongga menjadi semakin besar dan isolasi menjadi tipis.

## **2.5 Bahan Isolasi Cair**

Salah satu jenis bahan isolasi yang sering digunakan adalah bahan isolasi cair. Keunggulan bahan isolasi cair yaitu dapat mengisi seluruh volume bahan yang diisolasinya dan secara simultan akan mendisipasikan panas secara merata atau menyeluruh. Media minyak memiliki efisiensi yang lebih baik dari pada udara atau nitrogen dalam kemampuan menahan disipasi panas saat digunakan transformator.

Isolasi zat cair merupakan campuran dari hidrokarbon. Saat digunakan untuk mengisolasi peralatan listrik, isolasi cair harus terbebas dari uap air hasil oksidasi, karena akan berdampak pada kualitas dari isolasi cair tersebut. Faktor penting yang berdampak pada kekuatan dielektrik dari isolasi cair adalah keberadaan kontaminan yang ditimbulkan akibat tercampur dengan partikel-partikel yang lain. Keberadaan kontaminan pada isolasi cair dapat menurunkan kekuatan dielektriknya, karena medan listrik yang bergerak dari anoda ke katoda akan melewati partikel-partikel kontaminan tersebut.

## **2.6 Isolasi Minyak**

Isolasi merupakan suatu sifat bahan yang mampu untuk memisahkan dua buah penghantar atau lebih yang mempunyai jarak yang sangat berdekatan untuk mencegah terjadinya adanya arus bocor atau hubung singkat pada rangkaian, dan dapat melindungi sebagai pelindung mekanik dari kerusakan yang diakibatkan akibat korosif atau tekanan, baik tekanan elektrik maupun tekanan mekanik.

Isolasi minyak memiliki peranan penting dalam sistem isolasi transformator dan juga berfungsi sebagai pendingin antara kumparan kawat atau inti besi dengan sirip pendingin. Adapun beberapa tugas utama pada isolasi minyak, yaitu sebagai media isolator, media pendingin untuk memadamkan busur api dan media pelindung terhadap proses oksidasi yang mampu menyebabkan korosi pada peralatan logam. Pada Gambar 2.4 adalah salah satu contoh minyak isolasi jenis mineral.



**Gambar 2.4** Minyak isolasi

## 2.7 Isolasi Kertas

Komponen yang paling penting dari sistem isolasi kertas adalah yang membungkus lilitan konduktor tembaga atau aluminium yang tidak mudah diganti seperti pada Gambar 2.5. Isolasi kertas sangat penting karena keadaan kertas yang tidak bisa direkondisi, reklamasi ataupun diganti. Oleh karena itu umur material isolasi kertas, menjadi faktor pembatas dalam operasi transformator. Sebagian besar isolasi padat yang digunakan pada transformator memiliki karakteristik-karakteristik mekanis dan elektrik yang baik. Sifat ini akan berkurang apabila dipergunakan pada suhu yang tinggi dan dapat memperpendek umur transformator[5].



**Gambar 2.5** kertas isolasi pada transformator[5]



## 2.8 Kraft paper

Kertas kraft dibuat dari pulp kayu lunak yang tidak diputihkan oleh proses sulfat. Hasil proses akan menghasilkan kertas yang sedikit basa karena adanya kandungan sulfat. Proses memproduksi kertas sesuai dengan pabriknya. Kualitas dan keandalan kertas tergantung pada jenis proses pembuatan. Prosedur umum dimulai dengan pembuatan bubur kayu dari serat kering. Selanjutnya, sejumlah besar air dicampur dengan bubur kayu pulp untuk menghilangkan residu kimia dan prosedur ini dikenal sebagai proses *repulping*. Pemurnian dilakukan dengan menghancurkan serat dalam keadaan basah yang akan menghasilkan ikatan hydrogen diantara molekul selulosa[7].

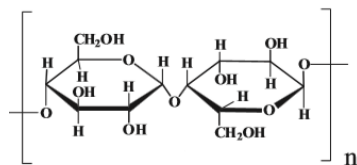
Kertas kraft pada transformator memiliki fungsi pada bagian isolasi antar lapisan (layer) coil pada sisi tegangan tinggi ataupun tegangan rendahnya. Berikut pada Gambar 2.5 adalah kertas kraft (*diamond-dotted paper*) yang biasa digunakan pada transformator.



**Gambar 2.6** Kertas kraft (*diamond-dotted paper*)

## 2.9 Struktur Pada Kertas Isolasi

Kertas isolasi terbuat dari bahan utama selulosa, kertas untuk dielektrik diproses dari pulp kayu kraft, kayu lunak atau kayu pinus. Isolasi kertas terdiri dari 90% selulosa, 6-7% hemi-selulosa, 3-4% lignin. Pada keadaan kering kertas kraft terdiri dari 40-50% selulose, 10-30 hemi-selulosa dan 20-30% lignin[8]. Selulosa mempunyai rumus kimia  $C_6H_{10}O_5$  yang merupakan polimer yang mengikat molekul glukosa, struktur senyawa pada Gambar 2.7[9]. Pada pembentukan kertas, kandungan air dapat mencapai 98%, dengan proses selanjutnya yaitu proses pengeringan supaya kandungan air sekitar 5%. Dielektrik pada kertas tergantung dari minyak yang direndamkan dan selulosa bahan kertasnya. Perendaman kertas menggunakan minyak akan mengurangi kelembapan dan tertutupnya pori – pori pada kertas oleh minyak sehingga sifat dielektriknya semakin kuat dan lebih baik



**Gambar 2.7** Struktur Kimia dari Selulosa

## 2.10 Impregnasi Isolasi Kertas pada Minyak

Impregnasi atau perendaman isolasi kertas kedalam isolasi minyak untuk menambah kekuatan dielektrik pada transformator. Impregnasi kertas menggunakan minyak akan mengurangi pengaruh kelembapan dan terisinya pori-pori kertas sehingga dielektrik dalam bentuk komposit menjadi lebih baik. Dengan lamanya waktu operasi, maka keandalan dari transformator akan menurun dan resiko kegagalan akan meningkat[9]. Sistem isolasi kertas yang terendam dalam minyak sangat menentukan keandalan operasional dari tranformator. Kertas termasuk dalam kelas isolasi Y yang mempunyai kemampuan untuk menahan suhu sekitar 90°C. Pada Tabel 2.1 menunjukan kelas isolasi padat berbagai jenis bahan[10].

**Tabel 2.1** Kelas isolasi bahan padat

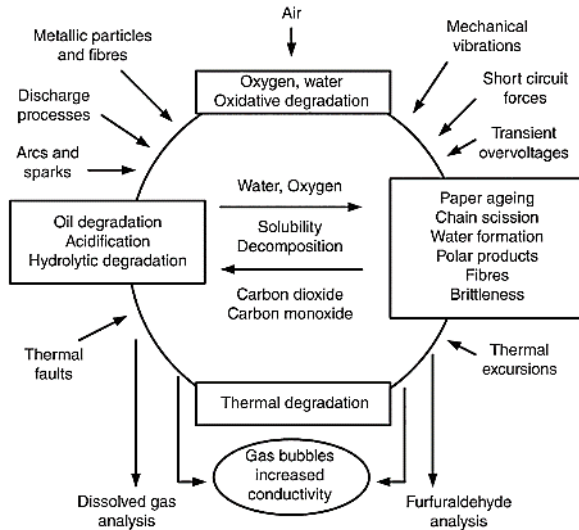
Kelas	Kemampuan menahan suhu	Bahan
Y	90°C	Sutra, katun, kertas, kayu tanpa impregnasi
A	105 °C	Bahan isolasi kertas Y yang diisolasi dengan resin/minyak.
E	120 °C	Enamel resin, katun, kertas dengan formaldehyde.
B	130 °C	Mika, fiberglass, asbes dengan pengikat yang sesuai.
F	155 °C	Bahan dari kelas B dengan pengikat yang lebih baik.
H	180 °C	Fiberglass, asbes dengan pengikat silikon
C	240 °C	Mika, keramik, kaca dengan pengikat yang mempunyai kualitas sangat baik.

Tabel 2.1 memperlihatkan bahwa bahan isolasi kelas Y yang diimpregnenasi dengan resin atau minyak maka kelas isolasi berubah menjadi kelas isolasi A dengan kemampuan menahan suhu hingga 105°C. proses impregnasi dapat dilakukan dengan merendam pada isolasi kertas kedalam isolasi minyak, sehingga terjadi ikatan adhesi antara minyak dan kertas. Kekuatan ikatan tergantung kemampuan daya tarik partikel pada minyak dan kertas. Pada bahan isolasi kertas secara mikroskopis akan terdapat *void* atau bagian yang berlubang. Dengan impregnasi maka pori-pori (*void*) tersebut akan tertutup oleh minyak sehingga akan menambah nilai tegangan tembus pada isolasi kertas. Proses impregnasi juga bertujuan untuk mengurangi sifat hidroskopis pada kertas.

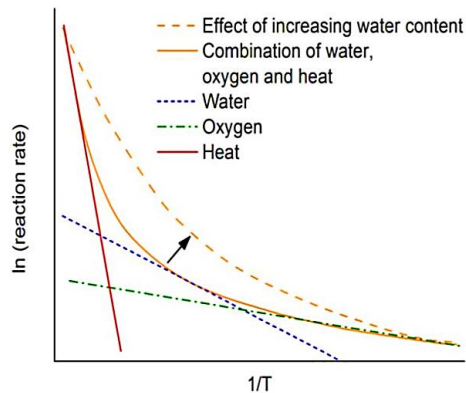
## **2.11 Mekanisme Penuaan Kertas**

Isolasi kertas dan minyak sangat berkontribusi dalam proses terjadinya kegagalan pada transformator, dimana kertas yang diimpregnasi oleh minyak digunakan untuk tujuan mekanis dan elektrik. Penuaan minyak dan kertas di transformator adalah fenomena yang kompleks dan dapat dipengaruhi oleh banyak faktor seperti yang dijelaskan oleh Gambar 2.8[11]. Hal ini menunjukkan bahwa penuaan minyak dan kertas dapat dipercepat dengan adanya oksigen dan air. Termal juga dapat meningkatkan penuaan minyak dan kertas. Sumber lain yang dapat mempercepat penuaan untuk kertas bias berasal dari air, asam dan oksigen yang dihasilkan oleh penuaan minyak.

Saat kertas mencapai titik jenuh, serat pada kertas akan terlarut dalam minyak. Serat-serat yang dikombinasikan dengan partikel-partikel metalik yang berasal dari tangka dapat memulai pelepasan yang dapat menyebabkan percikan dalam minyak. Resiko kegagalan pada transformator akan meningkat setelah kertas mengalami degradasi. Gambar 2.9 menunjukkan sketsa tingkat penuaan terhadap mekanisme penuaan yang berbeda. Tingkat penuaan dipengaruhi oleh energy aktivasi dan faktor lingkungan untuk setiap suhu yang diberikan[11].



**Gambar 2.8** Faktor yang mempengaruhi kinerja dan umur dari isolasi pada transformator[11].



**Gambar 2.9** Plot Arrhenius dengan perbedaan mekanisme penuaan[11]

### **BAB III**

## **PENGARUH KENAIKAN TEMPERATUR DAN VARIASI KETEBALAN ISOLASI KERTAS**

Dalam bab ini akan dijelaskan tentang identifikasi masalah, metodologi penelitian, dan prosedur penelitian untuk mengetahui pengaruh kenaikan temperatur dan variasi ketebalan pada isolasi kertas dengan direndam pada isolasi minyak terhadap *breakdown voltage*.

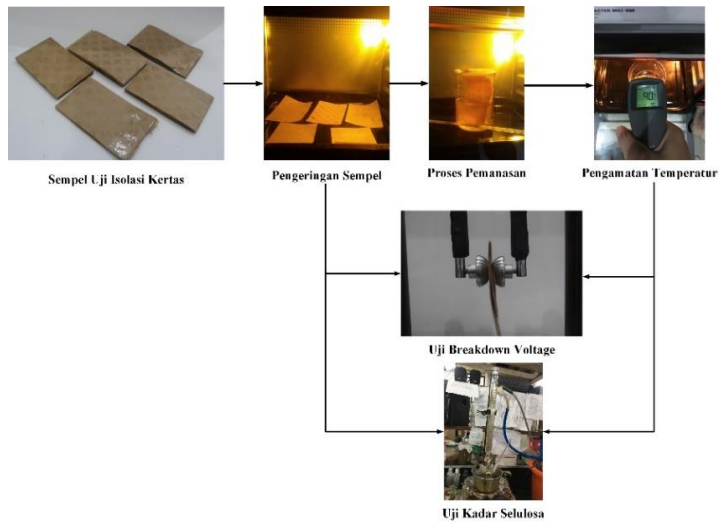
### **3.1 Identifikasi Masalah**

Permasalahan yang terjadi akibat penuaan atau penurunan kualitas minyak dan kertas isolasi pada transformator akibat kenaikan temperatur yang sangat tinggi saat pembebanan berlebih selama proses transformator beroperasi pada sistem. Saat terjadinya pembebanan berlebih maka transformator beroperasi akan menyuplai beban yang besar, sehingga arus yang dilewati pada transformer semakin besar. Kenaikan arus akan mengakibatkan peningkatan temperature pada belitan yang mengakibatkan panas, panas yang timbul secara terus menerus akan mengalami degradasi kualitas sebagai bahan isolasi yaitu berupa minyak dan kertas isolasi pada transformator. Degradasi kualitas isolasi akan mempengaruhi kualitas, selain itu *breakdown voltage* sebagai karakteristik elektrik dari kedua isolasi untuk menjalankan fungsinya sebagai bahan isolasi. Isolasi cair memiliki nilai *breakdown voltage* yang tinggi. Ketika temperature naik, isolasi minyak dan kertas akan mengalami pemanasan berlebih maka senyawa hidrokarbon dalam minyak dan kertas akan mengalami proses oksidasi dan mengalami degradasi. Proses degradasi pada bahan isolasi tersebut akan menurunkan nilai *breakdown voltage* dan kandungan kadar selulosa pada kertas isolasi.

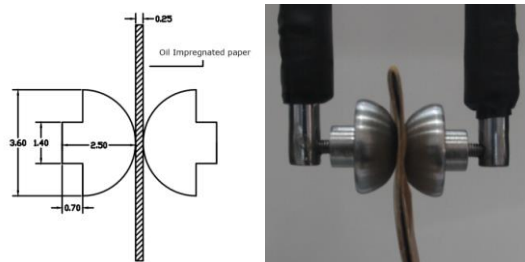
### 3.2 Metodologi Penelitian

Pada Penelitian ini dilakukan sesuai *experiment set-up* pada Gambar 3.1 untuk mengetahui *breakdown voltage* dari isolasi kertas terdapat dua pengujian yang dilakukan yaitu, pengujian isolasi kertas dengan pengaruh temperature dan ketebalan kertas yang direndam dalam isolasi minyak mineral, dan pengujian isolasi kertas dengan ketebalan yang berbeda tanpa perendaman. Adapun pengujian kadar selulosa pada kertas. Sebelum melakukan pengujian kertas dipotong dengan ukuran 8cm x 10cm, kemudian kertas dipanaskan atau dikeringkan pada suhu diatas suhu 35°C yang bertujuan untuk memperkecil kadar air didalam kertas. Pada pengujian isolasi kertas yang direndam pada minyak mineral ini menggunakan pengaruh temperature dengan menggunakan temeperatur 30°C - 135°C dengan pertambahan temperature 15°C setiap sampelnya.

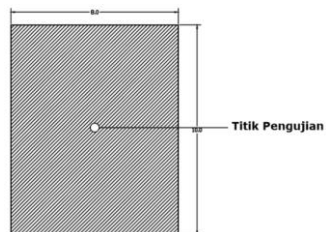
Setelah melakukan proses penuaan pada kedua isolasi tersebut, dilakukan observasi dan pengujian tegangan tembus pada setiap sampelnya. Pengujian *breakdown voltage* dilakukan sesuai standart IEC 60156, dengan menggunakan dua buah elektroda berbentuk *mushroom* dengan diameter lingkaran 25mm sesuai pada Gambar 3.5. Pada pengujian ini tegangan diterapkan pada salah satu elektroda, dan elektroda yang lain dihubungkan pada *ground*, pengujian dilakukan dengan menaikkan tegangan hingga terjadi *breakdown voltage*. Pengujian dilakukan sesuai pada Gambar 3.2, elektroda harus berhimpit pada isolasi kertas, dan isolasi kertas harus diuji pada titik ditengah bahan isolasi kertas yang sesuai pada Gambar 3.3, karena dapat berpengaruh pada permukaan isolasi yang tidak merata yang dapat menyebabkan hasil tidak sesuai. Adapun pengujian *Chesson* untuk mengetahui kadar selulosa. Setelah data diperoleh dari hasil pengujian, maka dilakukan pengolahan data menggunakan rata-rata *breakdown voltage* dan dilakukan plot data berupa grafik. Dari grafik tersebut dapat dilihat karakteristik isolasi kertas dan kandungan selulosa sebelum direndam dan direndam dengan pengaruh temperatur tinggi.



**Gambar 3.1** *Experiment Set-Up*



**Gambar 3.2** Pengujian Terhadap isolasi kertas



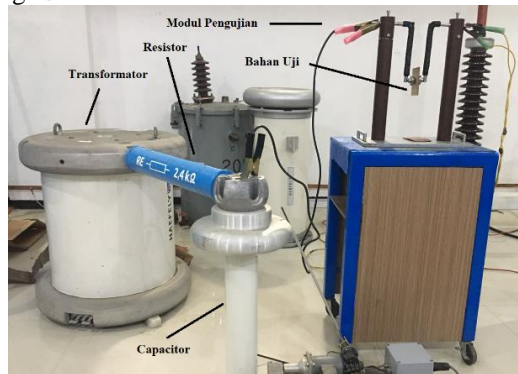
**Gambar 3.3** Titik pengujian *breakdown voltage* terhadap isolasi kertas

### 3.3 Perlatan pengujian

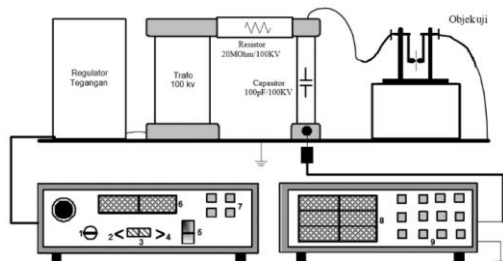
Adapun peralatan untuk melakukan pengujian yang perlu disediakan untuk melakukan penelitian, berikut adalah alat yang perlu digunakan:

#### 3.3.1 Pembangkitan Tegangan Tinggi AC

Pembangkitan tegangan tinggi AC 100 kV seperti pada Gambar dibawah 3.4. Pembangkitan tegangan tinggi AC digunakan untuk menguji ketahanan isolasi kertas. Tegangan yang dibangkitkan berasal dari tegangan sumber PLN yaitu 220 V yang kemudian di *step up* atau dinaikan tegangan menjadi 100 kV. Nilai tegangan testing merupakan nilai puncak ( $V_{peak}$ ), dan untuk mendapatkan nilai  $V_{rms}$  maka nilai puncak harus dibagi  $\sqrt{2}$ .



(a)



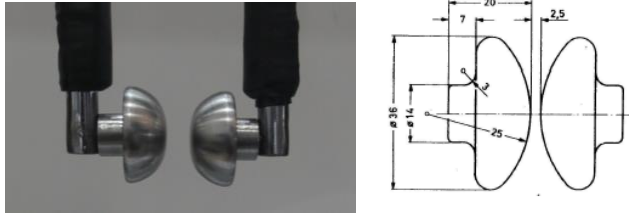
(b)

**Gambar 3.4** Pembangkitan Tegangan Tinggi AC (a), Skema Pembangkitan Tegangan AC (b)



### 3.3.2 Modul Pengujian

Modul percobaan dengan menggunakan elektroda *mushroom* sesuai standart IEC 60156 yaitu 25 mm , seperti pada Gambar 3.5 dibawah ini.



**Gambar 3.5** Elektroda *mushroom*

### 3.3.3 Peralatan Tambahan

Gelas *beaker* seperti pada Gambar 3.6(b) untuk bejana perendaman, Thermometer IR pada Gambar 3.6(a), Pemanas listrik (oven) pada Gambar 3.6(c) sebagai pemanas, Micrometerskrup pada Gambar 3.6(d) untuk meneliti ketebalan kertas.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Gambar 3.6** Thermometer IR(a), Gelas *beaker*(b), Pemanas listrik(c), Micrometer Sekrup(d).

### 3.4 Bahan Pengujian

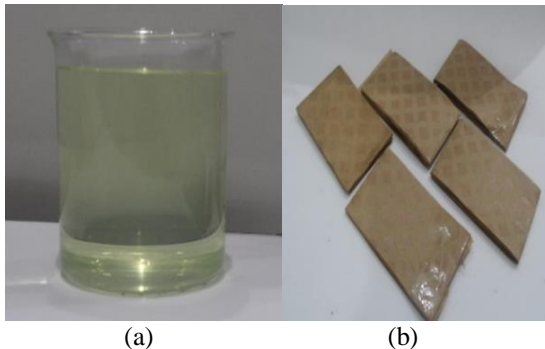
Bahan-bahan yang perlu digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 3.4.1 Kertas Isolasi

Kertas isolasi yang digunakan adalah kertas kraft dengan jenis *diamond-dotted paper* yang berukuran 0.05 mm. pada penelitian ini dibutuhkan variasi ketebalan 0.05 mm, 0.25 mm, 0.50 mm, 0.75 mm, dan 1 mm. ketebalan kertas dilakukan dengan menambahkan lapisan sampai ketebalan yang diinginkan dengan menggunakan *micrometerskrup*. Gambar 3.6 b. merupakan sampel kertas yang digunakan.

#### 3.4.2 Minyak Mineral

Minyak transformer yang digunakan adalah minyak jenis mineral yang bermerk *Nynas Nitro Libra*, Minyak mineral tersebut merupakan hasil olahan dari minyak bumi yang sering digunakan oleh produsen transformer karena harganya yang lebih murah dari pada minyak jenis sintetis. Pada gambar 3.6 a. merupakan sampel minyak isolasi.



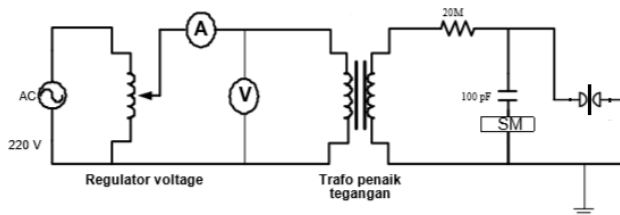
**Gambar 3.7** Sampel Minyak Mineral (a), Kertas DDP (b)

### 3.5 Prosedur Penelitian

Terdapat prosedur yang digunakan dan dilakukan sebelum melakukan pengujian. Prosedur tersebut merupakan hal-hal yang paling utama untuk melakukan pengujian, agar dalam pengujian dapat berjalan secara aman untuk keselamatan dan baik. Berikut adalah prosedur penelitian yang harus terpenuhi yaitu:

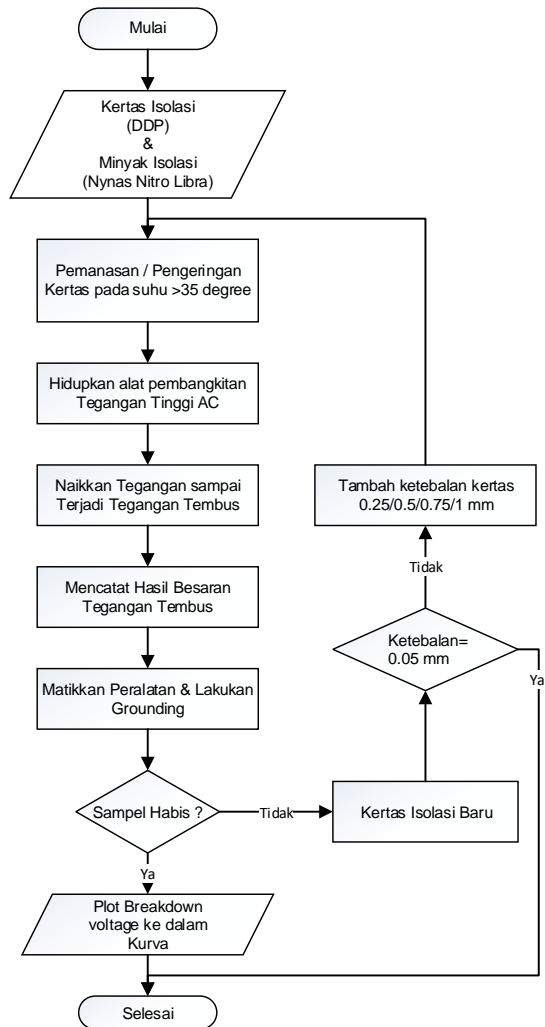
- Diagram rangkaian alat pengujian dengan menggunakan pembangkitan tegangan AC 100 kV, dengan tegangan sumber dari PLN 220 V seperti pada Gambar 3.7
- Flow chart pengujian harus terpenuhi, flowchart seperti pada Gambar 3.9 untuk Isolasi kertas yang direndam dengan pengaruh perubahan temperature serta ketebalan, dan Gambar 3.8 untuk isolasi kertas tanpa direndam.
- Pentanahan (*Grounding*), harus ada dan terpasang di sekitar tempat pengujian untuk keamanan saat pengujian.
- Pengecekan Pentanahan sistem (*Grounding system*) pada alat pengujian hanya terhubung pada terminal alat dan sistem pentanahan terhubung langsung dengan tanah.

Berikut diagram rangkaian pengujian:



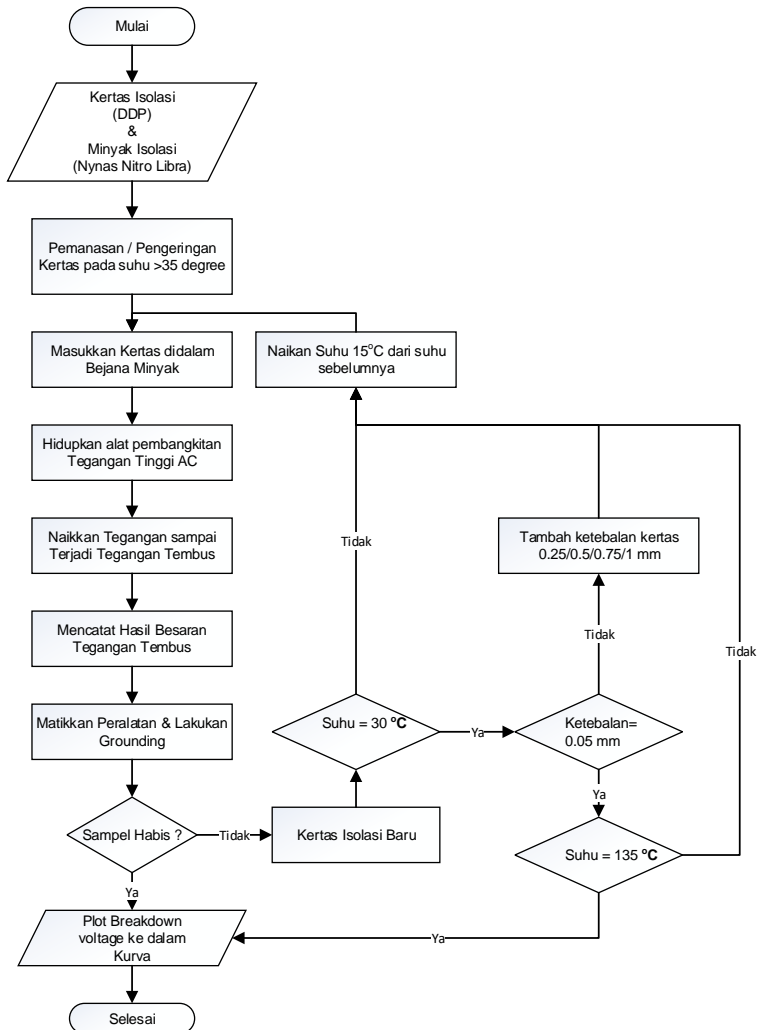
**Gambar 3.8** Rangkaian pengujian *breakdown voltage*

### 3.5.1 Flowchart Pengujian Isolasi Kertas Tanpa Direndam



**Gambar 3.9** Flowchart pengujian *breakdown voltage* isolasi kertas tanpa direndam

### 3.5.2 Flowchart Pengujian Isolasi Kertas yang Direndam



**Gambar 3.10** Flowchart pengujian *breakdown voltage* isolasi kertas tanpa direndam

### 3.6 Pengujian Isolasi Kertas Tanpa Perendaman

Setelah prosedur pengujian terpenuhi maka dilakukan pengujian sampel isolasi kertas tanpa perendaman, yaitu pada kondisi kertas kering (*dry*) dengan mengeringkan terlebih dahulu kertas isolasi pada oven untuk meminimalkan kandungan air yang ada pada kertas. Setelah proses pengeringan kertas isolasi selesai, Kemudian diuji tegangan sampai terjadi *breakdown voltage*, setelah itu mencatat hasil *breakdown* untuk mengetahui karakteristiknya setiap pertambahan suhu dan ketebalan kertas dengan direndam pada isolasi minyak dengan asumsi ukuran ketebalan 0.05, 0.25, 0.5, 0.75, dan 1 mm dengan menggunakan micrometerskrup.



**Gambar 3.11** Sampel kertas isolasi dalam kondisi kering (*dry*)

### 3.7 Pengujian Isolasi Kertas Dengan Perendaman dan Kenaikan Temperatur serta Ketebalan

Setelah prosedur pengujian terpenuhi maka dilakukan pengujian sampel isolasi kertas yang direndam dengan kenaikan temperature pada minyak isolasi dengan mengeringkan terlebih dahulu kertas isolasi pada oven untuk meminimalkan kandungan air yang ada pada kertas. Kemudian sampel kertas dimasukkan kedalam minyak untuk proses thermal. Proses thermal yang digunakan antara lain dengan suhu 30°C - 135°C, sampel terdapat 7 kali proses thermal dengan penambahan suhu 15°C antara lain 30 °C, 45 °C, 60 °C, 75 °C, 90 °C, 105 °C, 120 °C, dan 135 °C. Pada gambar 3.11 merupakan contoh sampel yang direndam dalam minyak isolasi.

Kemudian setelah direndam kertas isolasi diuji tegangan sampai terjadi *breakdown voltage* , setelah itu mencatat hasil *breakdown* untuk mengetahui karakteristiknya setiap pertambahan suhu dan ketebalan kertas dengan direndam pada isolasi minyak dengan ukuran ketebalan 0.05, 0.25, 0.5, 0.75, dan 1 mm dengan menggunakan micrometerskrup. Pada gambar 3.12(a) merupakan sampel pengukuran pada temperatur 30°C pada kondisi kertas yang direndam pada minyak, dan pada gambar 3.12(b) merupakan sampel pengukuran pada temperature 105 °C.



**Gambar 3.12** Pemanasan kertas isolasi(a), Pengecekan suhu(b)

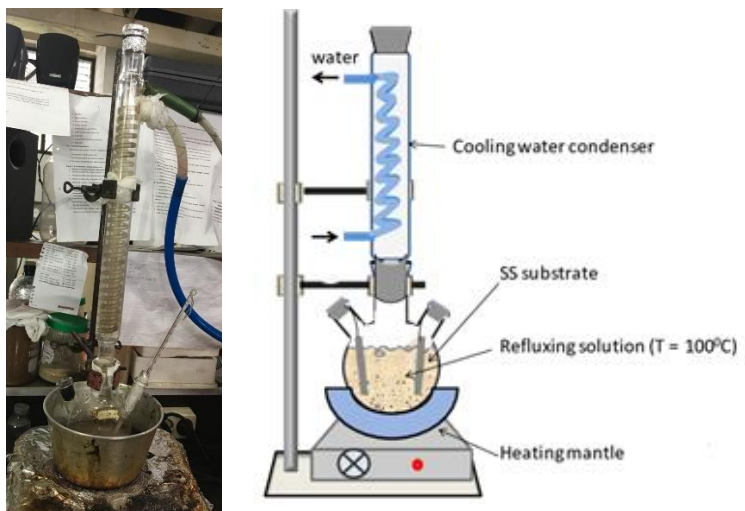
### 3.8 Pengujian Kadar Selulosa

Pengukuran kadar selulosa dilakukan di laboratorium biomassa Teknik Kimia Intitute Teknologi Sepuluh Nopember, pengukuran kadar selulosa dianalisis dengan menggunakan metode *Chesson* yaitu sampel pada kertas isolasi pada kondisi kering dan direndam pada minyak dengan pengaruh temperatur yang digunakan adalah 105°C, untuk mengetahui kadar pada kedua sampel tersebut. Langkah untuk mengukur kadar selulosa berdasarkan metode *Chesson* yaitu, Satu gram sampel dikeringkan (berat a) ditambahkan 150 mL H<sub>2</sub>O atau alcohol-benzena dan direfluk pada suhu 100°C dengan water bath selama 1 jam seperti pada gambar 3.13. Hasilnya disaring, residu dicuci dengan air

panas 300 mL. Residu kemudian dikeringkan dengan oven sampai beratnya konstan dan kemudian ditimbang (berat b). Residu ditambah 150 mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kemudian direfluk dengan water bath selama 1 jam pada suhu 100°C. kemudian hasilnya disaring, residunya dikeringkan hingga beratnya konstan (berat c). hasil residu yang sudah kering, ditambahkan 100mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dan direndam pada suhu ruang, selama 4 jam. Setelah direndam ditambahkan 150 mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dan direfluk pada suhu 100°C dengan water bath selama 1 jam. Residu disaring kembali dan dicuci dengan H<sub>2</sub>O (400mL). Residu kemudian dipanaskan dengan suhu 105°C menggunakan oven sampai beratnya konstan dan ditimbang (berat d).

Perhitungan kadar selulosa menggunakan metode *Chesson* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Kadar Selulosa} = \frac{\text{berat c} - \text{berat d}}{\text{berat a}} \times 100\% \quad (3.1)$$



**Gambar 3.13** Proses refluks dengan water bath



## **BAB IV**

### **HASIL DAN ANALISA**

Pengujian dilakukan di Laboratorium Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Bahan pengujian yang digunakan adalah kertas Kraft (*Diamond-Dotted Paper*) dan minyak mineral (*Nynas Nitro Libra*). Dari hasil pengujian didapatkan data nilai *breakdown voltage* isolasi yang digunakan pada transformator, dengan pengaruh kenaikan temperature dan variasi ketebalan lapisan kertas dalam kondisi terendam (*impregnation*) dan kondisi kering (*dry*). Temperature yang digunakan pada pengujian terendam yaitu 30 °C sampai 135 °C dengan kenaikan setiap temperature 15 °C, dengan asumsi ketebalan yang digunakan 0.05 mm, 0.25 mm, 0.5 mm, 0.75 mm, dan 1 mm. Data tersebut kemudian diolah sehingga didapatkan hubungan parameter satu dengan parameter yang lain untuk mendapatkan karakteristik pada isolasi kertas.

#### **5.1 Pengujian Ketebalan Isolasi Kertas dalam Kondisi Kering (Dry)**

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik *breakdown voltage* dari isolasi kertas dengan variable ketebalan tanpa proses perendaman, pada percobaan ini dilakukan sebanyak 6 sampel pengujian. Setiap sampel dikeringkan terlebih dahulu menggunakan pemanas oven dengan suhu > 35 °C untuk mengurangi kadar air pada isolasi kertas. Pada pengujian ini dilakukan sesuai prosedur untuk mendapatkan hasil yang baik. Pada pengujian ini tegangan yang dibangkitkan pada pembangkitan tegangan tinggi AC dilakukan secara bertahap, kenaikan ini dilakukan untuk mendapatkan hasil *breakdown voltage* pada isolasi kertas. Setelah pengujian satu sampel selesai dilanjutkan dengan sampel berikutnya dengan ketebalan isolasi kertas yang berbeda, dengan pengujian sesuai prosedur. Nilai *breakdown voltage* kemudian dirata-rata kemudian diplot berupa grafik untuk mengetahui karakteristik dari pengaruh ketebalan isolasi kertas. Berikut merupakan data dari pengujian isolasi kertas dalam kondisi kering (*dry*).

**Tabel 5.1** Nilai *Breakdown voltage* dengan ketebalan 0.05 mm

No	Nilai
Pengujian	<i>Breakdown Voltage</i> (kV)
1	0,4
2	0,42
3	0,44
4	0,41
5	0,40
6	0,45
Rata-rata(kV)	0,42

**Tabel 5.2** Nilai *Breakdown voltage* dengan ketebalan 0.25 mm

No	Nilai
Pengujian	<i>Breakdown Voltage</i> (kV)
1	2,02
2	2,4
3	2,1
4	2,27
5	2,5
6	2,74
Rata-rata(kV)	2,34

**Tabel 5.3** Nilai *Breakdown voltage* dengan ketebalan 0.5 mm

No	Nilai
Pengujian	<i>Breakdown Voltage</i> (kV)
1	5,5
2	5,3
3	5,6
4	5,5
5	5,4
6	5,5
Rata-rata(kV)	5,47

**Tabel 5.4** Nilai *Breakdown voltage* dengan ketebalan 0.75 mm

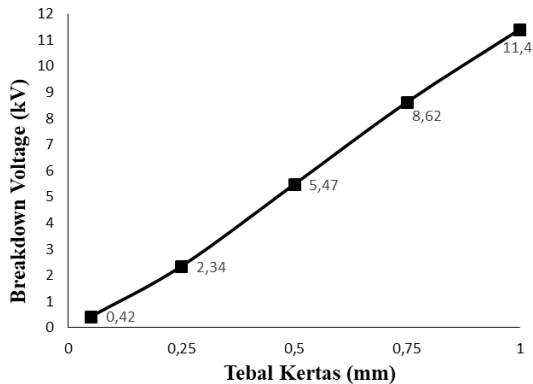
No	Nilai
Pengujian	<i>Breakdown Voltage</i> (kV)
1	8,6
2	9,1
3	8,1
4	8,6
5	8,8
6	8,5
Rata-rata(kV)	8,62

**Tabel 5.5** Nilai *Breakdown voltage* dengan ketebalan 1 mm

No	Nilai
Pengujian	<i>Breakdown Voltage</i> (kV)
1	11,7
2	11,5
3	10,48
4	12,2
5	11,1
6	11,4
Rata-rata(kV)	11,40

### 5.1.1 Analisis Hubungan *Breakdown Voltage* Isolasi Kertas dalam Kondisi Kering (Dry)

Dari data hasil pengujian yang telah dilakukan maka data tersebut diplotkan ke dalam grafik.



**Gambar 5.1** Grafik hasil pengujian *breakdown voltage* isolasi kertas .

Dari grafik gambar 4.1, merupakan grafik dari pengaruh ketebalan isolasi kertas terhadap *breakdown voltage*, bahwa semakin tebal isolasi kertas maka *breakdown voltage* yang terjadi semakin tinggi. Hal ini disebabkan jarak elektroda pada isolasi kertas akan bertambah. Nilai *breakdown voltage* juga dapat dipengaruhi oleh kandungan air yang ada dalam isolasi kertas karena keterbatasan peralatan uji yang hanya meminimalkan kandungan air yang ada pada bahan isolasi kertas. Nilai *breakdown voltage* pada ketebalan 0.05 mm sebesar 0.42 kV bertambah pada ketebalan 1 mm nilai yang didapatkan sebesar 11,4 kV. Pada Gambar 4.1 didapatkan persamaan *breakdown voltage* (y) dengan pertambahan ketebalan kertas (x) sebagai berikut:

$$y = 11,78x - 0,36$$

Ketebalan kertas juga dipertimbangkan karena memiliki pengaruh pada desain transformator, dengan semakin tebal lapisan kertas yang digunakan maka jarak antar leyer akan semakin bertambah, hal itu dapat

menyebabkan terjadinya leakage flux yang berpengaruh terhadap kuat medan pada belitan yang dapat menurunkan efisiensi pada transformator.

## 5.2 Pengujian Pengaruh Kenaikan Temperatur Isolasi Kertas yang Direndam pada Isolasi Minyak

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik *breakdown voltage* dari pengaruh kenaikan temperature isolasi kertas yang direndam pada isolasi minyak, pada percobaan ini dilakukan sebanyak 6 sampel uji setiap temperaturnya. Setiap sampel dikeringkan terlebih dahulu untuk mengurangi kadar air pada isolasi kertas. Pada pengujian ini dilakukan sesuai prosedur untuk mendapatkan hasil yang baik. Sampel direndam dalam isolasi minyak dengan kenaikan temperature yang digunakan 30 °C sampai 135 °C dengan kenaikan 15 °C setiap sampel nya, Jadi terdapat 7 sampel untuk kenaikan suhu nya. Berikut Tabel 4.6 merupakan hasil pengujian dari pengaruh kenaikan temperature dengan ketebalan dari kertas kraft (DDP) 0.05 mm.

**Tabel 5.6** Hasil pengujian Kenaikan temperature Isolasi kertas yang direndam pada isolasi minyak

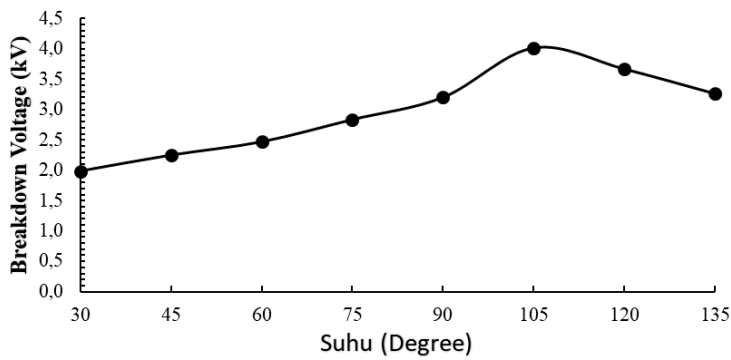
No	SUHU dengan perendaman (Degree)							
Pengujian	30	45	60	75	90	105	120	135
1	2,2	2,4	2,6	2,8	3,2	3,8	3,8	3,4
2	2	2,14	2,6	3,2	3	3,9	3,8	3,2
3	1,7	2,24	2,4	2,8	3,5	4	3,6	3,25
4	1,9	2,2	2,5	2,8	3	4,2	3,6	3,5
5	2	2,3	2,4	2,4	3,3	4,2	3,5	3,2
6	2,1	2,2	2,3	3	3,2	4	3,7	3
Rata-rata (kV)	1,98	2,25	2,47	2,83	3,20	4,02	3,67	3,26

### 5.2.1 Analisis Hubungan *Breakdown Voltage* dengan Pengaruh Kenaikan Temperatur Isolasi Kertas yang Direndam pada Isolasi Minyak

Perendaman(*impregnasi*) isolasi kertas kedalam isolasi minyak untuk menambah kemampuan isolasi menahan tegangan *breakdown voltage*, karena karakteristik minyak yang dapat mengisi suatu ruang

pada pori-pori kertas. Dengan peningkatan temperature pada isolasi minyak yang menambah nilai *breakdown voltage*. Kertas termasuk dalam isolasi kelas Y dengan kemampuan menahan suhu sekitar 90(105) °C.

Dari data hasil pengujian yang telah dilakukan maka data tersebut diplotkan ke dalam grafik.



**Gambar 5.2** Grafik *breakdown voltage* akibat pengaruh kenaikan temperatur isolasi kertas yang direndam pada isolasi minyak.

Grafik *breakdown voltage* akibat pengaruh kenaikan temperature pada gambar 4.2 menunjukkan bahwa proses pemanasan berpengaruh pada *breakdown voltage*. Isolasi kertas dengan tebal 0.05 mm yang direndam pada isolasi minyak. Nilai *breakdown voltage* mengalami kenaikan yang tidak linier, pada keadaan temperature lebih dari 105 °C nilai *breakdown voltage* mengalami penurunan karena terjadi proses degradasi pada isolasi kertas karena panas yang tinggi. Maka dari hasil diatas dapat dibuktikan dengan perendaman kertas isolasi dalam minyak dapat menambah kemampuan kertas untuk menahan temperature sampai suhu 105°C, yang dapat dikategorikan isolasi kelas Y seperti pada tabel 2.1.

### 5.3 Pengujian Pengaruh Kenaikan Temperatur Isolasi Kertas dan Ketebalan yang Direndam pada Isolasi Minyak

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik *breakdown voltage* dari pengaruh kenaikan temperature isolasi kertas yang direndam pada isolasi minyak, pada percobaan ini dilakukan sebanyak 6 sampel pengujian. Setiap sampel dikeringkan terlebih dahulu menggunakan pemanas oven dengan temperatur lebih dari 35 °C untuk mengurangi kadar air pada isolasi kertas. Pada pengujian ini dilakukan sesuai prosedur untuk mendapatkan hasil yang baik. Sampel direndam dalam isolasi minyak dengan kenaikan temperature yang digunakan 30 °C sampai 135°C dengan kenaikan 15°C setiap sampel nya. Ketebalan yang digunakan yaitu, 0.25mm, 0.5mm, 0.75mm, 1mm.

**Tabel 5.7** Hasil pengujian Kenaikan temperature Isolasi kertas yang direndam dengan ketebalan 0.25 mm

No	SUHU dengan perendaman (Degree)							
Pengujian	30	45	60	75	90	105	120	135
1	8,4	8,8	10,8	11,27	13,1	15,15	14	13,8
2	7,3	8,65	10,86	11,07	13,4	15,2	13,9	13,76
3	8,2	8,6	10,7	10,9	13,12	15,2	14,8	13,86
4	7,9	9,5	10,72	11,24	13,5	15,26	14,4	14,1
5	8,1	9,65	10,6	11,3	13,62	15,45	14,5	13,76
6	7,8	8,9	10,8	10,98	13,4	15,1	14,2	13,68
Rata-rata(kV)	7,95	9,02	10,75	11,13	13,36	15,23	14,30	13,83

**Tabel 5.8** Hasil pengujian Kenaikan temperature Isolasi kertas yang direndam dengan ketebalan 0.50 mm

No	SUHU dengan perendaman(Degree)							
Pengujian	30	45	60	75	90	105	120	135
1	11,7	12,03	14,3	15,6	16,65	18,55	16,8	16,55
2	11,73	12,3	14	15,54	16,2	18,3	17,56	16,6
3	11,6	12,42	13,8	15,04	16,7	17,8	17,2	16,8
4	11,8	12,7	14,7	15,4	16,6	17,9	17,4	16,3
5	11,68	12,8	14,4	15,68	16,45	18,3	17,2	16,75
6	11,2	12,65	14,3	15,5	16,15	18,04	17,35	16,8
Rata-rata(kV)	11,62	12,48	14,25	15,46	16,46	18,15	17,25	16,63

**Tabel 5.9** Hasil pengujian Kenaikan temperature Isolasi kertas yang direndam dengan ketebalan 0.75 mm

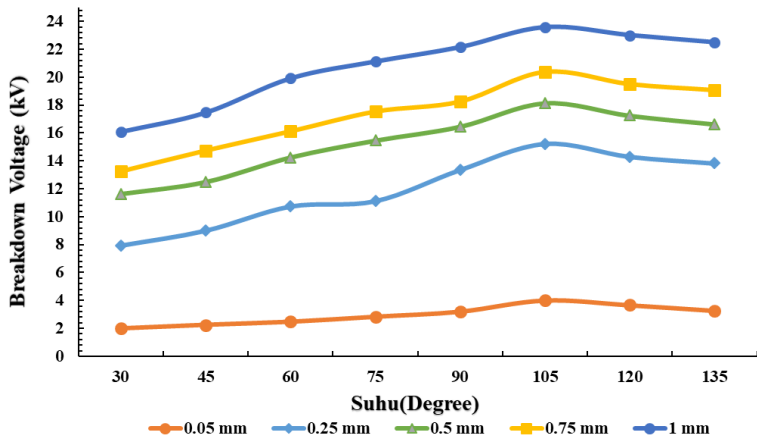
No	SUHU dengan perendaman(Degree)							
Pengujian	30	45	60	75	90	105	120	135
1	13,3	14,5	15,8	17,9	18,14	20	19,4	18,9
2	13,5	14,36	16,2	17,1	18,4	20,8	19,2	19,2
3	13,03	14,8	16,34	17,6	18,2	20,2	19,35	18,75
4	13,4	15,2	15,8	17,4	18,35	20,6	19,8	19,35
5	13,45	14,6	16,2	17,45	18,3	20,45	19,9	19,4
6	12,8	15	16,4	17,8	18,18	20,3	19,45	18,9
Rata-rata(kV)	13,25	14,74	16,12	17,54	18,26	20,39	19,52	19,08

**Tabel 5.10** Hasil pengujian Kenaikan temperature Isolasi kertas yang direndam dengan ketebalan 1 mm

No	SUHU dengan perendaman(Degree)							
Pengujian	30	45	60	75	90	105	120	135
1	15,7	16,18	19,56	21,46	22,18	23,4	23,2	22,5
2	15,58	17,55	20,2	21,2	22,1	23,7	23	22,9
3	16,5	17,8	20,1	21	21,9	23,4	23,4	22,2
4	16,2	18,3	19,8	20,8	22,45	23,2	22,45	22,65
5	16,5	17,85	20,3	20,95	21,8	23,65	23,2	22,28
6	16,14	17,2	19,56	21,3	22,45	24,1	22,8	22,45
Rata-rata(kV)	16,10	17,48	19,92	21,12	22,15	23,58	23,01	22,50



### 5.3.1 Analisis Hubungan *Breakdown Voltage* dengan Pengaruh Kenaikan Temperatur dan Ketebalan Isolasi Kertas yang Terendam pada Isolasi Minyak



**Gambar 5.3** Pengaruh kenaikan temperature dan ketebalan kertas yang direndam pada minyak

Penambahan jumlah lapisan kertas dan kenaikan temperature akan meningkatkan nilai *breakdown voltage* dengan peningkatan yang tidak linier, seperti pada Gambar 4.2. Semakin tebal lapisan isolasi kertas maka nilai *breakdown voltage* semakin tinggi dengan pertambahan temperature juga dapat menambahkan nilai *breakdown voltage* sampai temperature lebih dari 105 °C mengalami penurunan nilai *breakdown voltage*, akibat terjadinya proses degradasi pada isolasi kertas yang dipanaskan.

#### 5.4 Analisis Mekanisme Kegagalan Isolasi Kertas yang direndam Minyak

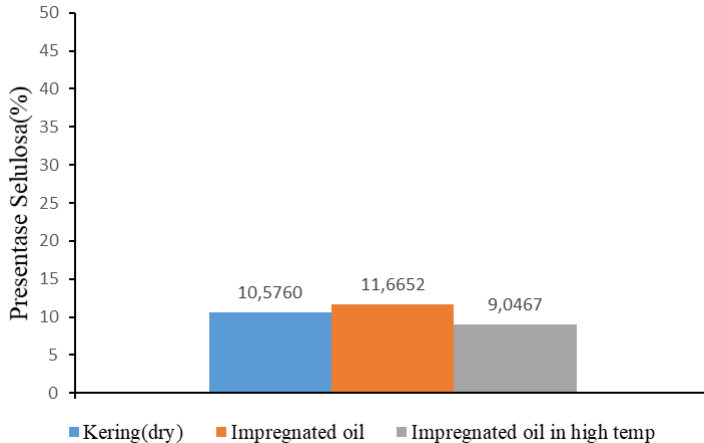
Pada saat beroperasi, transformator mengalami perubahan temperature sesuai kondisi beban. Pada saat beban tinggi, maka temperature akan meningkat. Pengaruh kenaikan temperature akan mengakibatkan perubahan pada komponen-komponen termasuk sistem isolasi. Perubahan temperature akan mengakibatkan perubahan nilai *breakdown voltage* sistem isolasi terutama isolasi kertas. Hasil pengujian tegangan tinggi menunjukkan bahwa nilai *breakdown voltage* isolasi kertas akan meningkat sampai ke temperature 105 °C. Pada temperature isolasi dinaikan melebihi temperatur tersebut maka nilai dari *breakdown voltage* menurun. Hal ini menunjukkan terdapat suatu proses yang terjadi pada sistem isolasi saat beroperasi.

Pada penelitian ini menggunakan isolasi kertas yang direndam dalam minyak pada proses pemanasan. Dengan pengaruh kenaikan temperature, air yang terkandung dalam kertas akan terurai akibat panas bersama minyak. Uap air akan terperangkap dalam minyak, terlepasnya uap air dari kertas, kemudian minyak mengisi rongga-rongga pada kertas yang akan mengurangi kadar air dalam isolasi kertas. Dengan berkurangnya kadar air yang terperangkap didalam isolasi menyebabkan faktor terjadinya kegagalan akan berkurang dan nilai *breakdown voltage* akan meningkat pada temperatur 30 °C sampai 105 °C.

Pada temperatur lebih dari 105 °C daya tahan isolasi kertas untuk menahan temperatur akan mengalami penurunan karena degradasi pada struktur kertas, dengan berkurangnya daya tahan atau kemampuan menahan temperatur maka nilai *breakdown voltage* akan menurun. Dengan ditandai penurunan kadar selulosa yang berkurang terdapat pada Tabel 4.11 merupakan hasil dari uji kadar selulosa. Pengujian kadar selulosa dilakukan sampai 120°C dengan mempertimbangkan *flashpoint* pada isolasi minyak mineral dengan titik *flashpoint* 135 °C, titik *flashpoint* merupakan kemampuan isolasi minyak untuk menahan temperatur, maka nilai *breakdown voltage* akan turun dan sistem isolasi mengalami kegagalan.

**Tabel 5.11** Hasil Kadar Selulosa dengan Uji Chesson

Sampel	Berat(gram)				Berat
	a	b	c	d	% Selulosa
Kering(dry)	1,007	0,9423	0,8778	0,7713	10,5760
Impregnated oil	1,0107	0,8877	0,8418	0,7239	11,6652
Impregnated oil in high temp	1,007	0,8734	0,8275	0,7364	9,0467

**Gambar 5.4** Grafik kadar selulosa pada kertas

Pada Gambar 4.4 merupakan hasil uji kadar selulosa dengan metode *Chesson*, pada kertas isolasi jenis kraft yang digunakan. Pada pengujian isolasi kertas kering didapatkan 4 tahap pengujian berat, dengan menggunakan persamaan 3.1 maka diperoleh prosentase kadar selulosa seperti pada Tabel 4.11. Hasil kertas pada keadaan kering didapatkan nilai kadar selulosa 10,57%, kemudian pada saat direndam dalam minyak mengalami peningkatan kadar selulosa pada kertas sebesar 11,66% dan pada saat pengaruh temperatur tinggi yaitu 120°C nilai *breakdown voltage* mengalami penurunan, dan kadar selulosa mengalami penurunan sebesar 9,04%, hal tersebut dikarenakan proses degradasi akibat panas yang berlebih pada kertas. Jadi kadar selulosa juga dapat berpengaruh terhadap nilai *breakdown voltage* pada suatu isolasi kertas, semakin rendah kadar selulosa maka nilai *breakdown voltage* akan mengalami penurunan.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **6.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis, maka pada Tugas Akhir ini dapat disimpulkan bahwa:

1. Karakteristik isolasi kertas tanpa dilakukan perendaman didapatkan hasil nilai *breakdown voltage* semakin meningkat dengan bertambahnya ketebalan kertas
2. Kegagalan pada isolasi kertas dapat terjadi karena rongga udara pada isolasi kertas yang dapat mengakibatkan terjadinya peluahan parsial pada bahan dielektrik sehingga membantu terjadinya *breakdown voltage*.
3. Rendaman isolasi minyak pada kertas menyebabkan peningkatan nilai *breakdown voltage*, hal tersebut disebabkan karena rongga udara terisi oleh minyak sehingga dapat menambah kualitas isolasi.
4. Kemampuan isolasi kertas untuk menahan temperatur sampai dengan 105°C, sesuai dengan kemampuan isolasi kelas Y dengan penambahan isolasi minyak
5. Pada tempertur yang tinggi akan menyebabkan nilai kadar selulosa mengalami penurunan, penurunan kadar selulosa akan berpengaruh terhadap kualitas dari isolasi kertas.

#### **6.2 Saran**

Setelah dilakukan analisis ini, saran yang dapat diberikan untuk perbaikan yaitu Tugas Akhir ini hanya terbatas pada peralatan pengujian yang tidak kedap udara karena ketidakteredian peralatan. Dengan kondisi real pengujian dilakukan dengan kedap udara karena isolasi minyak mudah bereaksi dengan udara sehingga perlu meminimalisir pengujian dengan udara bebas. Perlunya pengujian kadar air pada isolasi kertas dan minyak dikarena kadar air pada kedua isolasi sangat berpengaruh dengan nilai *breakdown voltage*. Perlunya pengujian tentang kadar fulfural pada isolasi kertas

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Muchlis and A. D. Permana, "Proyeksi Kebutuhan Listrik PLN 2003 s.d. 2020," *Pengemb. Sist. Kelistrikan dan Menunjang Pembang. Nas. Jangka Panjang*, p. 11 Halaman, 2003.
- [2] R. Radhitya, "Pengaruh Rendaman Minyak Transformator Terhadap Kekuatan Dielektrik Isolasi Kertas," *Tek. Elektro Univ. Gadjah Mada, Yogyakarta*, 2014.
- [3] I. J. Prakoso, "Analysis of Characteristic Pre-Breakdown Voltage Phenomenon Based Experiment on Oil," 2017.
- [4] A. Windarto, Suharyanto, and T. Haryono, "Pengaruh Kadar Air terhadap Karakteristik Tegangan," *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, vol. 4, no. 2, pp. 2–5, 2015.
- [5] L. Nasrat, N. Kassem, and N. Shukry, "Aging Effect on Characteristics of Oil Impregnated Insulation Paper for Power Transformers," *Sci. Res.*, vol. 2013, no. January, pp. 1–7, 2013.
- [6] C. Tang, R. J. Liao, L. J. Yang, and F. L. Huang, "Research on the dielectric properties and breakdown voltage of transformer oil-paper insulation after accelerating thermal ageing," in *2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application, ICHVE 2010*, 2010, pp. 389–392.
- [7] T. A. Prevost and T. V. Oommen, "Cellulose insulation in oil-filled power transformers: Part I - History and development," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 22, no. 1, pp. 28–34, 2006.
- [8] Suwarno and S. Aminudin, "Investigation on thermal aging of ester from palm oil and kraft paper composite insulation system for high voltage transformer," *WSEAS Trans. Environ. Dev.*, vol. 13, pp. 75–84, 2017.
- [9] P. Saha, Tapan Kumar. Prithwiraj, *Transformer Ageing: Monitoring and Estimation Techniques*. .
- [10] S. Ohta, "Temperature Classes of Electrical Insulators," *Three Bond Tech. News*, vol. 13, no. 1, pp. 1–10, 1985.
- [11] N. Azis, "Ageing Assessment of Insulation Paper with Consideration of In-Service Ageing and Natural Ester Application," p. 213, 2012.
- [12] C. Tang, R. Liao, F. Huang, L. Yang, and M. Zhu, "The breakdown voltage of power transformer insulation paper after thermal aging," *Diangong Jishu Xuebao/Transactions China Electrotech. Soc.*, vol. 25, no. 11, 2010.

## **LAMPIRAN A**

1. Data Sheet Kertas isolasi jenis Kraft ( *diamond-dotted paper* )
2. Data Pengujian Sampel (Original)